

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BRUNA CHAVES AMARAL

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA PARTE MINEIRA DA BACIA DO RIO
DOCE ANTES E APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO,
MARIANA - MG**

Ibatiba
2022

BRUNA CHAVES AMARAL

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA PARTE MINEIRA DA BACIA DO RIO
DOCE ANTES E APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO,
MARIANA - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Ibatiba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Benvindo Sirtoli Gardiman Junior

Ibatiba

2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Ifes - Campus Ibatiba)

A485a Amaral, Bruna Chaves, 1998-
Avaliação da qualidade da água na parte mineira da bacia do
rio Doce antes e após o rompimento da barragem de Fundão,
Mariana – MG / Bruna Chaves Amaral. – 2022.
40 f. : il.

Orientador: Benvindo Sirtoli Gardiman Junior.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Instituto
Federal do Espírito Santo, 2022.

1. Engenharia ambiental - Monografias. 2. Barragens de
rejeitos - Minas e mineração. 3. Degradação ambiental. 4. Água -
Poluição. 5. Água - Qualidade. 6. Doce, Rio (MG e ES). I.
Gardiman Junior, Benvindo Sirtoli. II. Instituto Federal do Espírito
Santo. Campus Ibatiba. III. Título.

CDD 628


BRUNA CHAVES AMARAL

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA PARTE MINEIRA DA BACIA DO
RIO DOCE ANTES E APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO,
MARIANA - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Ambiental do Instituto Federal do
Espírito Santo - Campus Ibatiba, como
requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.


Aprovado em: 28 de novembro de 2022

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **BENVINDO SIRTOLI GARDIMAN JUNIOR**
Data: 07/12/2022 15:29:01-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Dr. Benvindo Sirtoli Gardiman Junior
Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Ibatiba

Orientador


Documento assinado digitalmente
 **WALLISSON DA SILVA FREITAS**
Data: 07/12/2022 16:01:28-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Dr. Wallisson da Silva Freitas
Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Ibatiba

Membro Interno

Phelipe Augusto Carvalho Campos
Universidade Federal do Espírito Santo

Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **PHELIPE AUGUSTO CARVALHO CAMPOS**
Data: 07/12/2022 14:34:40-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Para Euzi Chaves e Adão Amaral, que me deram a vida, me conduziram para o bem e incentivaram a minha educação.

Para Emanuelle Chaves, que me amparou nos momentos mais difíceis, tornando-os brandos.

Para todos os meus amigos, alunos e professores que passaram, que continuarão e que virão a integrar o curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental no Ifes - *campus* Ibatiba, desejo a todos, uma brilhante caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade e por todo o suporte nessa grande jornada, me ajudando a vencer todos os desafios propostos diariamente.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, tornaram a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) possível.

Ao meu orientador, o Doutor Benvindo Sirtoli Gardiman Junior, pela sua disponibilidade, acompanhamento no estudo e paciência.

Aos meus amigos, por todo o apoio e pelo encorajamento.

A minha família, pelo enorme apoio que tem oferecido ao longo destes anos e por ter me inculcido princípios que tento seguir, entre os quais, nunca desistir.

O sertão vai virar mar

É o mar virando lama

Gosto amargo do Rio Doce

De Regência a Mariana

Gabriel Contino e Ricardo Cruz

RESUMO

O rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/ MG, ocorrido em 05 de novembro de 2015, lançou no curso do rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce cerca de trinta e quatro milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro, afetando a qualidade da água local. E, à vista disso, este trabalho objetivou avaliar as alterações sobre as variáveis de qualidade das águas superficiais da porção mineira da bacia do rio Doce antes e após o rompimento da barragem de Fundão. Para uma melhor otimização dos dados, a pesquisa foi dividida em: a) análise comparativa da qualidade das águas nos pontos escolhidos com as legislações vigentes antes do desastre; b) análise comparativa da qualidade das águas nos pontos escolhidos com as legislações vigentes depois do desastre; e c) discussão sobre as alterações dos dados a partir dos resultados estatísticos. Verificou-se que as variáveis Alumínio, *E. coli*, Ensaio ecotoxicológico, Ferro, Fósforo, Manganês, Sólidos em Suspensão, Sulfeto e Turbidez, apresentaram padrões de desconformidade com as legislações vigentes nos períodos anteriores e posteriores, intensificando seu percentual após o rompimento da barragem de Fundão. Portanto, os dados referentes a qualidade da água realizadas ao longo dos anos já sofria em relação à contaminação devido ao esgotamento sanitário, mas foi potencializada após o rompimento da barragem, principalmente em relação as variáveis: manganês, sólidos em suspensão e turbidez.

Palavras-chave: Rio Doce. Desastre Ambiental. Qualidade da Água. Barragem. Análise de água.

ABSTRACT

The rupture of the Fundão Dam in Mariana/MG, which occurred on November 5, 2015, released about thirty-four million m³ of iron ore tailings into the course of the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers, affecting the local water quality. And, in view of this, this work aimed to evaluate changes in the quality variables of groundwater in the Minas Gerais portion of the Doce River basin before and after the Fundão dam rupture. For a better optimization of the data, the research was divided into: a) comparative analysis of the water quality at the chosen points with the legislation in force before the disaster; b) comparative analysis of the water quality at the chosen points with the legislation in force after the disaster; and c) discussion about data changes based on statistical results. It was verified that the variables Aluminum, E. coli, Ecotoxicological test, Iron, Phosphorus, Manganese, Solids in Suspension, Sulphide and Turbidity, followed patterns of non-compliance with the legislation in force in the previous and subsequent periods, intensifying their percentage after the progress of the Fundão dam. Therefore, data referring to water quality carried out over the years already suffered in relation to contamination due to sewage, but were enhanced after the dam rupture, mainly in relation to the variables: manganese, solid in suspension and turbidity.

Keywords: Rio Doce. Environmental Disaster. Water quality. Dam. Water analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração dos pontos de monitoramento da qualidade da água na Bacia Hidrográfica do Rio Doce.	21
Figura 2 – Percentual de desconformidade das variáveis com os limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual e federal, nos anos de 2012 a 2015	26
Figura 3 – Percentual de desconformidade das variáveis com os limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual e federal, nos anos de 2016 a 2019.	27
Figura 4 – Média do percentual de desconformidade das variáveis com os limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual e federal, nos anos de 2012 a 2019.	28
Figura 5 – Percentual de desconformidade das variáveis de manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez, com os limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual e federal, nos anos de 2012 a 2019.	29
Figura 6 – Matriz de correlação entre os anos de 2012 a 2015	32
Figura 7 – Matriz de correlação entre os anos de 2016 a 2019	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs) com Comitês de Bacia e estações de monitoramento da qualidade da água.	15
Tabela 2 – Limite das variáveis de qualidade das águas superficiais analisados neste estudo para rios de enquadramento classe 2 de acordo com a DN COPAM CERH-MG 01/08.	19
Tabela 3 – Estações de monitoramento da qualidade de água analisados neste estudo e suas características do trecho hídrico.	22
Tabela 4 – Dados referente ao rio do Carmo, para as variáveis de manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez e, seus limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual, nos anos de 2015 e 2016.	30

LISTA DE SIGLAS

AF	Análise Fatorial
Al	Alumínio Dissolvido
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CE	Condutividade Elétrica
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cl ⁻	Cloreto
Clor a	Clorofila a
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
Cu	Cobre Dissolvido
E. coli	Escherichia coli
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DN	Deliberação Normativa
Fe	Ferro dissolvido
Ifes	Instituto Federal do Espírito Santo
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
MG	Minas Gerais
Mn	Manganês total
NH ₄ ⁺	Nitrogênio total
NO ₃	Nitrato
OD	Oxigênio dissolvido

pH	Potencial Hidrogeniônico
P total	Fósforo total
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SDT	Sólido Dissolvido Total
SST	Sólidos em Suspensão Total
UPGRH	Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos
Turb	Turbidez

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO.....	13
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE.....	14
3.2	ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA – MG.....	16
3.3	VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	17
3.4	LEGISLAÇÃO SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA	18
3.4	TÉCNICAS DE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA	19
4	METODOLOGIA.....	21
4.1	IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DOS DADOS	21
4.2	COMPARAÇÃO DOS DADOS COM A LEGISLAÇÃO	23
4.3	AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA	24
4.4	ANÁLISE DOS DADOS	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
6	CONCLUSÃO.....	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A água é uma substância química essencial para a permanência da vida na Terra. A qualidade de um determinado recurso hídrico está relacionada com as condições naturais, do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica, na qual pode ser modificada através de condições naturais e/ou interferências antrópicas (VON SPERLING, 2011).

De acordo com Lima (2015), o desenvolvimento demográfico e a urbanização desordenada têm contribuído para intervenções humanas negativas relacionada aos recursos naturais, sobretudo nos cursos d'água. Estas ações provocam diversos problemas e impactos que afetam a população e o meio ambiente. As alterações exercidas na biota de forma contínua têm levado a uma escassez na quantidade e na qualidade da água, evidenciado principalmente em ambientes como bacias hidrográficas.

A bacia do Rio Doce é um corpo hídrico pertencente à região hidrográfica do Atlântico Sudeste. Sua abrangência compreende um território que envolve os estados de Minas Gerais/MG e Espírito Santo/ES, sendo que a maior porção se encontra na parte mineira (COSTA *et al.*, 2001).

Em Minas Gerais, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) é um órgão vinculado à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), na qual possui um projeto chamado “Projeto Águas de Minas”, que trabalha com o monitoramento da qualidade das águas. Desde 2012, o programa disponibiliza anualmente uma série histórica de variáveis relacionadas a qualidade das águas.

No ano de 2015, a área que abrange toda a bacia do Rio Doce se tornou alvo de grande atenção nacional e internacional, devido ao rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – MG, que possui como responsável a empresa SAMARCO/VALE/BHP Billiton. Esta barragem continha rejeitos oriundos da mineração de ferro, onde foi depositado no decorrer dos rios próximos, se tornando o maior desastre socioambiental do país.

O volume estimado de rejeito despejado na Bacia do Rio Doce foi de aproximadamente 34 milhões de m³, totalizando 68% do total armazenado (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016). A grande maioria dos rios que foram afetados por este

rejeito de lama são fontes de captação para o abastecimento das comunidades próximas, onde muitas destas famílias não possuem outra forma de abastecimento de água.

Diante da gravidade dos impactos gerados neste desastre, tanto no curso d'água quanto nas comunidades envolvidas, verificou-se a necessidade de estudar os efeitos desse acidente sobre a qualidade da água. É importante se ter conhecimento das condições e características compostas na água para garantir os padrões exigidos na legislação vigente e o benefício de uma água de qualidade para a população, fauna e flora.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as alterações sobre as variáveis de qualidade das águas superficiais da porção mineira da bacia do rio Doce antes e após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – Minas Gerais, Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os pontos do curso d'água da Bacia do Rio Doce que receberam os rejeitos do rompimento da barragem Fundão, região impactada;
- Avaliar as possíveis alterações sobre as variáveis de qualidade da água da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce;
- Comparar os dados obtidos com os limites estabelecidos pela legislação vigente para os determinados parâmetros físico-químicos em águas superficiais;
- Discutir as correlações existentes entre as variáveis de qualidade da água antes e depois do rompimento da barragem.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

A bacia hidrográfica do rio Doce, encontra-se na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 17°45' e 21°15' S e os meridianos 39°30' e 43°45' W, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste. Sua dimensão de drenagem é de 83.400 km² e seu rio principal, o rio Doce, corre uma extensão de 853 km. A extensão da bacia compreende uma área que divide dois Estados, onde 86% está no Estado de Minas Gerais e 14% no Estado do Espírito Santo. Em termos político-administrativos, a região abrange atualmente 229 municípios com população total de 2,8 milhões de habitantes (IGAM, 2010a).

O estado de Minas Gerais está localizado nas cabeceiras do rio Piranga, na qual é o principal formador do rio Doce e do rio do Carmo (NASCIMENTO, 2009). As nascentes do rio Doce encontram-se no Estado de Minas Gerais, nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço. Suas águas percorrem por cerca de 850 km até atingir o município de Linhares e desaguar no oceano Atlântico, no Estado do Espírito Santo (IGAM, 2010b).

Segundo Guimarães (2018), a Bacia do Rio Doce é rica biodiversidade, onde possui 98% de sua área inserida no bioma de Mata Atlântica e 2% restantes são de Cerrado. Pode ser considerada beneficiada, no que se refere à grande disponibilidade de recursos hídricos, mas contém desigualdade entre as diferentes regiões da bacia.

A bacia do rio Doce na parte mineira é dividida em seis Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs), com Comitês de Bacia estruturados e estações de monitoramento da qualidade da água, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs) com Comitês de Bacia e estações de monitoramento da qualidade da água.

UPGRHs	Comitê de Bacia Hidrográfica	Estações
DO1	CBH do rio Piranga	15
DO2	CBH do rio Piracicaba	13
DO3	CBH do rio Santo Antônio	7
DO4	CBH do rio Suaçuí	13
DO5	CBH do rio Caratinga	8
DO6	CBH do rio Manhuaçu	8
TOTAL		64

Fonte: IGAM, 2010b.

O rio Doce, maior rio em extensão existente na bacia, compreende todas as UPGRHs e possui alguns pontos de monitoramento da qualidade da água no decorrer da sua abrangência, realizado pelo IGAM (IGAM, 2010b).

A população existente na bacia do Rio Doce é superior a 3,5 milhões de habitantes, sendo que 68,7% dos habitantes possuem características de população urbana (BRASIL, 2010). A região metropolitana do Vale do Aço é constituída por 24 municípios no interior de MG, possui o maior movimento populacional da bacia do Rio Doce e constata-se a existência de um fluxo migratório que se direciona, sobretudo, para as maiores cidades, como Ipatinga e Governador Valadares.

A atividade econômica da bacia do rio Doce é muito vasta, abrangendo desde a agropecuária, com cultivos da cultura de café e cana-de-açúcar, criação de gado leiteiro e de corte e na suinocultura; até a agroindústria; as indústrias; o comércio e a mineração de ferro, ouro, bauxita e até pedras preciosas (IGAM, 2010a).

De acordo com a Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005, as águas doces dispostas em território nacional devem passar por uma classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Na sua maioria, a bacia

hidrográfica do Rio Doce apresenta em seu enquadramento rios Classe 1 e 2, sendo o Rio Doce em sua totalidade, classificado como Classe 2 (IGAM, 2010c).

3.2 ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA – MG

O município de Mariana - MG utiliza da exploração de recursos minerais desde o século XVIII. Entre as décadas de 1960 a 2010, a cidade viu sua economia emergir com a implantação das mineradoras S.A. Mineração Trindade (Samitri), posteriormente, Samarco Mineração e Vale do Rio Doce (FAGUNDES, 2013).

Com a chegada destas empresas de grande porte, a região se beneficiou com a geração de empregos e o crescimento econômico dos municípios, entretanto, também foram notórios os impactos ambientais gerados e o perigo de acidentes nas barragens durante o passar dos anos.

Acidentes causados pela ruptura de barragens de rejeito não são raros e, geralmente, acontecem devido a problemas de gestão de segurança e as chuvas intensas incomuns (GUIMARÃES, 2018).

De acordo com a ANA (2015), o rompimento da barragem de Fundão da Samarco Mineração SA foi um grave desastre ambiental, econômico e social associado à mineração. Ocorrido em Mariana-MG, no dia 05/11/2015, o acidente resultou em uma onda de lama de rejeito de minério que destruiu a localidade de Bento Rodrigues em Mariana-MG e percorreu mais de 650 km até a foz do Rio Doce, em Linhares - ES.

O rompimento da barragem de Fundão também ocasionou o galgamento da barragem de Santarém, na qual acumulava água a jusante da barragem de Fundão. O efluente resultante do rompimento foi diluído com a água da barragem de Santarém e ganhou muita velocidade, o que intensificou a rapidez e a magnitude da destruição (FEAM, 2016).

3.3 VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água é reflexo do efeito combinado de muitos processos que ocorrem no curso d'água (PETERS; MEYBECK, 2000). Segundo Guedes *et al.* (2012), o controle e monitoramento da qualidade da água, por meio da análise das variáveis, é um dos principais instrumentos de sustentação de uma política de planejamento e gestão de recursos hídricos.

Na área de saneamento, os sólidos encontrados nas águas superficiais são caracterizados como toda matéria que se conserva como resíduo, após a evaporação, secagem ou calcinação de uma dada amostra. Através do exposto, estas operações são as que indicam as frações de sólidos presentes na água, sendo eles: sólidos totais, em suspensão, dissolvidos, fixos e voláteis. A turbidez de uma amostra de água é o grau de perda de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessá-la, devido à presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas e detritos orgânicos (CETESB, 2016).

Os metais pesados são componentes naturais que estão localizados no meio ambiente, identificados em minerais e rochas. A concentração de metais pesados nas águas depende de alguns fatores como, por exemplo, as reações químicas e a composição das rochas. Grande parte desses metais, são pouco solúveis e não dissolve na água (IGAM, 2015). Alguns dos metais pesados mais encontrados nas águas superficiais são alumínio (Al), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn).

O oxigênio dissolvido é originário da atmosfera que se dissolve nas águas naturais devido à diferença de pressão parcial. Já a DBO é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. Os coliformes termotolerantes são definidos como microrganismos do grupo coliforme capazes de fermentar a lactose a 44-45°C, sendo representados, principalmente pela *Escherichia coli* e, também por bactérias de outros gêneros (CETESB, 2016).

De acordo com a Von Sperling (2011), o nitrogênio pode ser encontrado nas águas nas formas de nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. O nitrogênio orgânico e

amoniaco são formas reduzidas e as outras, oxidadas. Junto do nitrogênio, o fósforo total contribui no enriquecimento do meio, tornando-o eutrofizado.

A influência do pH sobre os ecossistemas aquáticos naturais dá-se diretamente devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies. A condição de pH que corresponde a um ecossistema mais diversificado e a um tratamento mais estável é a de neutralidade (CETESB, 2016).

3.4 LEGISLAÇÕES SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA

As legislações ambientais são ferramentas de extrema importância dentro de qualquer sociedade. Sem estas regulamentações e leis adequadas, a preservação do meio ambiente seria inviável e difícil de ser controlada (BRASIL COLETA, 2019).

Por meio da legislação por ordem federal e estadual, a Resolução do Conselho Nacional Do Meio Ambiente - CONAMA 357/2005 e a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG 01/08, regem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o enquadramento dos rios, e estabelece as condições padrões de lançamento de efluentes.

As leis que configuram os limites de qualidade da água de ordem federal e estadual possuem as mesmas delimitações para as variáveis, portanto são caracterizadas de forma igual.

Na Tabela 2, estão apresentados os limites definidos dos parâmetros de qualidade da água, para os rios de enquadramento classe 2 dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e do Doce, de acordo com a DN COPAM CERH-MG 01/08.

Tabela 2 - Limite das variáveis de qualidade das águas superficiais para rios de enquadramento classe 2 de acordo com a DN COPAM CERH-MG 01/08.

Parâmetros	Limites exigidos na legislação federal e estadual	Unidades de medida
Alumínio dissolvido (Al)	< 0,1	mg.L ⁻¹ Al
Condutividade elétrica (CE)	Não há especificação	
Cloreto (Cl ⁻)	250	mg.L ⁻¹ Cl
Clorofila a (Clor A)	30	µg.L ⁻¹
Cobre dissolvido (Cu)	0,009	mg.L ⁻¹ Cu
Ensaio ecotoxicológico	Efeito Crônico	-
Escherichia coli (E. coli)	< 1.000	mg.L ⁻¹
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	< 5	mg.L ⁻¹
Ferro dissolvido (Fe)	< 0,3	mg.L ⁻¹ Fe
Fósforo Total (P total)	< 0,1	mg.L ⁻¹ P
Manganês total (Mn)	< 0,1	mg.L ⁻¹ Mn
Nitrato (NO ₃)	< 10,0	mg.L ⁻¹ N
Nitrogênio Total (NH ₄ ⁺)	3,7 mg.L ⁻¹ N, para pH ≤ 7,5	
Oxigênio dissolvido (OD)	> 5	mg.L ⁻¹
pH in loco	6 a 9	unidade de pH
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	< 500	mg.L ⁻¹
Sólidos em Suspensão Total (SST)	< 100	mg.L ⁻¹
Sulfeto	< 0,002	mg.L ⁻¹ S
Turbidez (Turb)	< 100	UNT

Fonte: COPAM, 2008.

3.5 MÉTODO ESTATÍSTICO

Segundo Lidiane *et al.* (2018), a matriz de correlação é um dos métodos utilizados para a análise estatística de dados históricos em diversas áreas de estudo, identificando visualmente as variáveis envolvidas e suas relações entre si. Este método é bastante utilizado na qualidade da água de cursos hídricos, a fim de determinar o grau de correlação entre duas ou mais variáveis.

A matriz de correlação ou covariâncias é um método estatístico, na qual o valor esperado de uma matriz consiste nos dados esperados de cada um de seus elementos (JOHNSON; WICHERN,1992). Portanto, para realizar uma matriz de covariâncias, é necessário que as variáveis possuam variâncias de magnitudes similares.

Na matriz de correlação, os elementos da diagonal principal são formados pelas variâncias das frequências absolutas padronizadas de cada classe e os demais elementos os valores de covariância entre pares de variáveis padronizadas (MELO JÚNIOR et al., 2006)

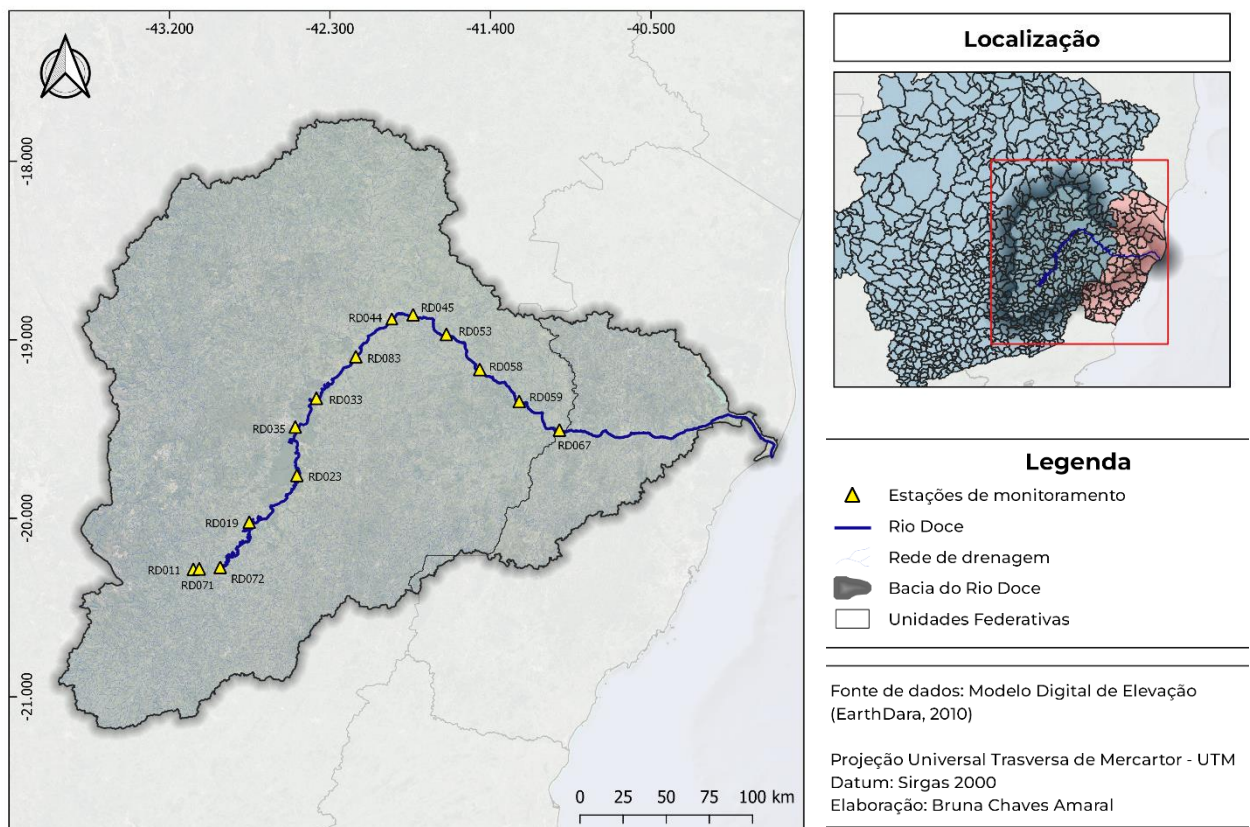
Cada variável pode ser analisada separadamente na matriz, através do comportamento de sua distribuição de probabilidades. Ressalva-se, no entanto, a importância da análise da matriz como um todo devido à possibilidade da existência de correlação entre as outras variáveis (MINGOTI, 2007). Ou, da possibilidade de as variáveis estarem distribuídas de forma independente, tornando a correlação nula.

4 METODOLOGIA

4.1. IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DOS DADOS

Esta pesquisa analisará os dados referentes a quatorze (14) estações de monitoramento das águas superficiais localizadas ao longo do Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce, na parte mineira da bacia hidrográfica do rio Doce (Figura 1), antes e após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – MG.

Figura 1 – Ilustração dos pontos de monitoramento da qualidade da água na Bacia Hidrográfica do Rio Doce.



Fonte: A autora.

Todos os pontos das estações de monitoramento são supervisionados pelo IGAM. Na Tabela 3, estão apresentadas as características e localizações das doze (12) estações

de monitoramento no rio Doce, uma (1) no rio do Carmo e uma (1) rio Gualaxo do Norte.

Tabela 3 - Estações de monitoramento da qualidade de água analisados neste estudo e suas características do trecho hídrico.

CURSO D' ÁGUA	MUNICÍPIO	ESTAÇÃO	LATITUDE (S)	LONGITUDE (W)	DESCRIÇÃO
Rio Gualaxo do Norte	Barra Longa	RD011	-20° 17' 9,81"	-43° 3' 57,02"	Rio Gualaxo do Norte, afluente do Rio Doce.
Rio do Carmo	Barra Longa	RD071	-20° 16' 58,199"	-43° 1' 56,338"	Rio do Carmo, afluente do Rio Doce.
Rio Doce	Rio Doce	RD072	-20° 16' 30"	-42° 54' 54"	Rio Doce no município de Rio Doce
Rio Doce	Rio Casca e São Domingos do Prata	RD019	-20° 1' 18,995"	-42° 45' 7,999"	Rio Doce entre os municípios de Rio Casca e São Domingos do Prata
Rio Doce	Marliéria e Pingo d'Água	RD023	-19° 45' 34,999"	-42° 29' 6"	Rio Doce entre os municípios de Marliéria e Pingo D'Água
Rio Doce	Belo Oriente	RD033	-19° 19' 38,935"	-42° 22' 32,977"	Rio Doce no município de Belo Oriente
Rio Doce	Ipatinga	RD035	-19° 29' 18,996"	-42° 29' 38,998"	Rio Doce no município de Ipatinga
Rio Doce	Periquito	RD083	-19° 5' 42,198"	-42° 9' 17,1"	Rio Doce a jusante do município de Periquito

Rio Doce	Governador Valadares	RD044	-18° 53' 0"	-41° 57' 10,001"	Rio Doce na cidade de Governador Valadares
Rio Doce	Governador Valadares	RD045	-18° 51' 36,194"	-41° 50' 1,356"	Rio Doce na cidade de Governador Valadares
Rio Doce	Tumiritinga	RD053	-18° 58' 10,193"	-41° 38' 49,394"	Rio Doce no município de Tumiritinga
Rio Doce	Conselheiro Pena	RD058	-19° 9' 58,846"	-41° 27' 35,69"	Rio Doce no município de Conselheiro Pena
Rio Doce	Resplendor	RD059	-19° 20' 45,719"	-41° 14' 19,496"	Rio Doce no município de Resplendor
Rio Doce	Aimorés	RD067	-19° 30' 20,002"	-41° 0' 47,002"	Rio Doce no município de Aimorés

Fonte: IGAM, 2015.

Os dados de qualidade de água foram coletados entre os anos de 2012 a 2019, como disponibilizado na página de monitoramento da qualidade das águas, no site do Portal do Meio Ambiente - MG.

4.2. COMPARAÇÃO DOS DADOS COM A LEGISLAÇÃO

Os parâmetros foram selecionados com base nas principais variáveis que influenciam a degradação desse curso hídrico. Dentre eles estão: alumínio dissolvido em mg.L⁻¹ Al; ensaio ecotoxicológico; *Escherichia coli* em mg.L⁻¹, ferro dissolvido em mg.L⁻¹ Fe; fósforo total em mg.L⁻¹ P; manganês total em mg.L⁻¹ Mn; sulfetos em mg.L⁻¹S e sólidos em suspensão em mg.L⁻¹ e turbidez em UNT.

Comparou-se os valores encontrados dos parâmetros com os dados exigidos nas legislações, as quais o recurso hídrico está submetido, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1/2008.

4.3. AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA

Para uma melhor otimização dos dados obtidos na comparação da qualidade das águas entre os dois períodos, optou-se por dividir a análise em três etapas.

1ª parte: Avaliação da qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio Doce no período anterior ao rompimento da barragem de Fundão (ano de 2012 a 2015) com a legislação COPAM/CERH-MG nº 1/2008.

2ª parte: Avaliação da qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio Doce no período posterior ao rompimento da barragem de Fundão (ano de 2016 a 2019) com a legislação COPAM/CERH-MG nº 1/2008.

3ª parte: Discussão sobre as alterações do rompimento da barragem na qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio Doce a partir dos resultados das correlações.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A junção das variáveis que influenciam a qualidade da água será identificada e caracterizada com uso do método estatístico da Matriz de Correlação. Segundo Toledo e Nicolella (2002), este modelo estatístico visa representar o processo de poluição, a fim de conhecer as principais variáveis que influenciam a degradação desse curso hídrico.

As quatorze (14) estações de monitoramento do IGAM são analisadas a cada quatro (4) meses e repetidos em dois (2) dias distintos nestes meses. Portanto, ao realizar a Matriz de Correlação no período de antes e depois do rompimento da barragem de

Fundão, quatro (4) anos antes e quatro (4) anos depois, serão considerados 448 dados para cada período e para cada parâmetro.

Os parâmetros utilizados estatisticamente são coliformes totais, condutividade elétrica, cloreto, clorofila a, cobre dissolvido, *E. Coli*, DBO, fósforo total, nitrato, nitrogênio total, pH, oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, sólidos em suspensão total e turbidez.

A fim de determinar a forma original de distribuição dos dados, foram calculados a média e o desvio padrão, para igualar as diferentes unidades de medidas, como utilizada por Vicini (2005) na equação 1, a seguir:

Equação 1: Padronização das medições para certificar que os pesos das análises estejam iguais.

$$X_{sij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{s_i}$$

em que:

X_{sij} é a i-ésima observação da variável j-ésima padronizada;

x_{ij} é o valor i-ésimo observado da j-ésima variável;

\bar{x}_i é a média da j-ésima e i-ésima variável;

s_i é o desvio padrão da variável x_{ij} ;

i é a média da amostra x_{ij} ;

i é o número de variáveis; e

j é o número de pontos de coleta.

Em seguida, criou-se a matriz de correlação entre as variáveis padronizadas. A matriz de correlação consiste em um triângulo inferior da matriz que exhibe as correlações simples entre todos os pares possíveis de variáveis incluídos na análise.

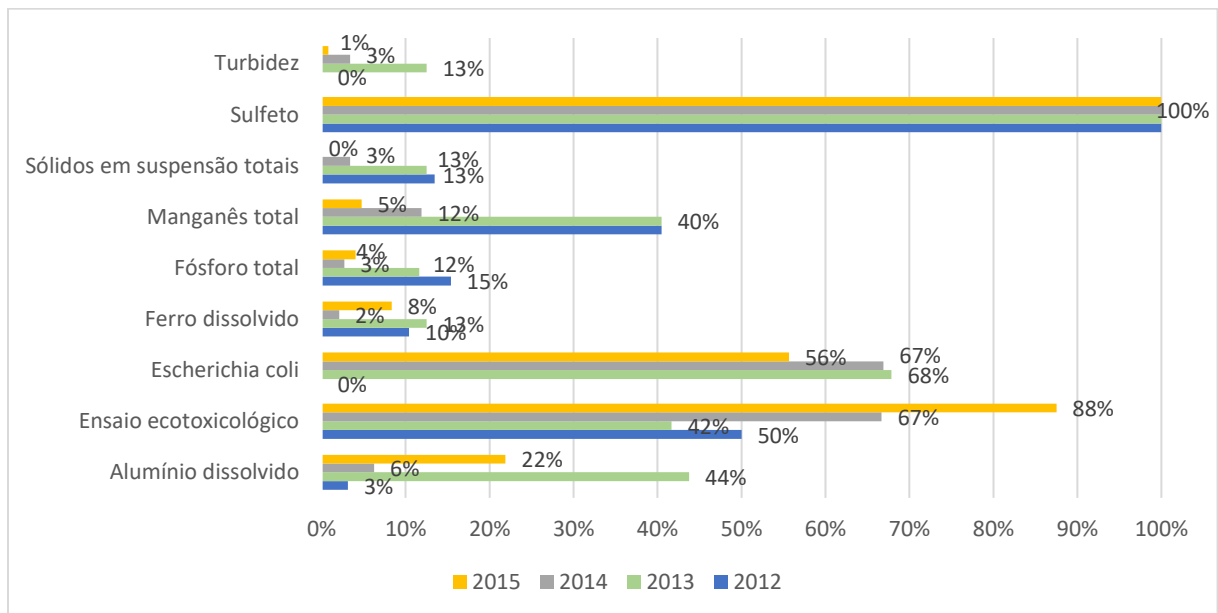
Para determinar a significância das correlações da matriz de correlação, os dados foram analisados através do programa estatístico Jamovi®, versão 1.6.

As variáveis com coeficiente de determinação maior ou igual a 0,7 ou menor ou igual a -0,7 serão selecionadas, conforme realizado por alguns autores (PEREIRA, 1999; CARREIRO, 2021; GUEDES *et al.*, 2012).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se, na Figura 2, o percentual das variáveis em desconformidade com os padrões de qualidade da água, estabelecido pela legislação, no período de 2012 a 2015, anos que antecederam o rompimento da barragem de Fundão. Em destaque estão os sulfetos, cuja totalidade de amostras coletadas estavam acima do limite estabelecido, *E. Coli* com mais de 56% nos anos de 2013 a 2015 e ensaio ecotoxicológico com mais de 42% dos dados.

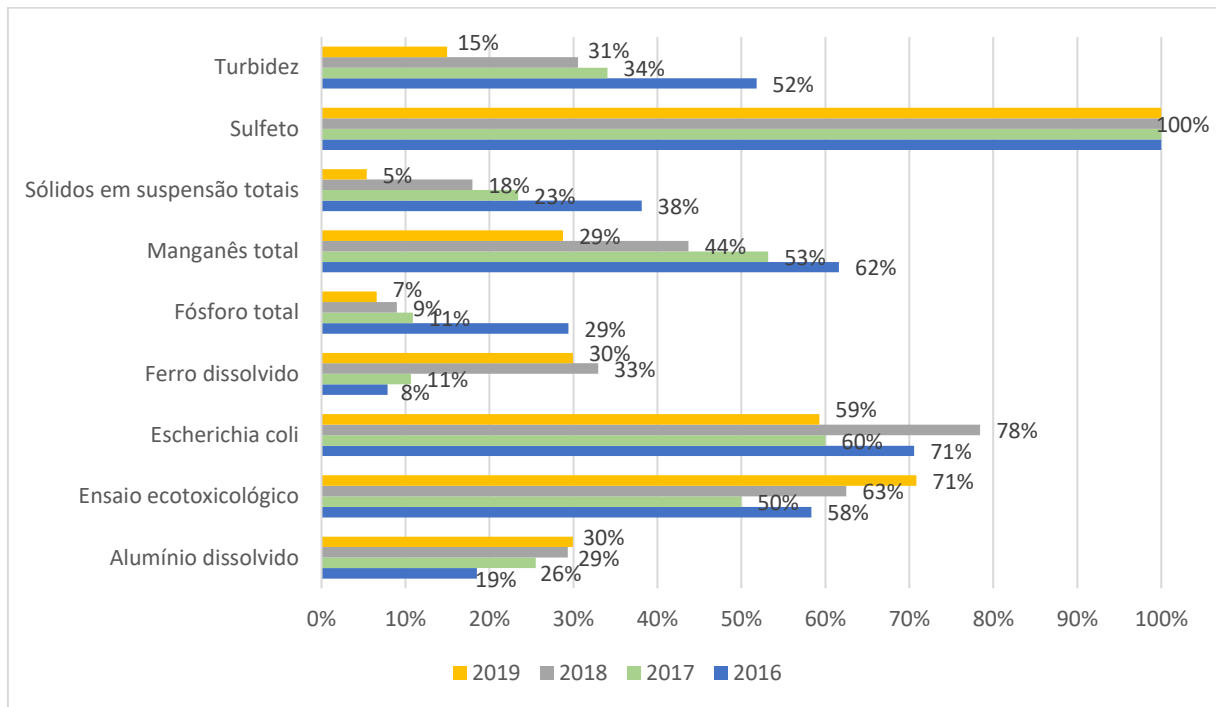
Figura 2 - Percentual de desconformidade das variáveis com os limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual, nos anos de 2012 a 2015.



Fonte: A autora.

Na Figura 3 é apresentado o percentual das variáveis em desconformidade com os padrões de qualidade da água, estabelecido pelas legislações, no período de 2016 a 2019, anos posteriores ao rompimento da barragem de Fundão. Em destaque estão os sulfetos, cuja totalidade de amostras coletadas permaneceu acima do limite estabelecido, *E. Coli* aumentou seu percentual em 3%, apresentando-se com 59% de desconformidade e, o manganês com um crescimento percentual muito alto em relação aos anos anteriores.

Figura 3 - Percentual de desconformidade das variáveis com os limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual, nos anos de 2016 a 2019.



Fonte: A autora.

Os parâmetros referentes a *E. coli*, ensaio ecotoxicológico e sulfetos estão relacionados a descarga de esgotos sanitários domésticos e de efluentes industriais, na qual é lançado em grande parte da extensão da Bacia do Rio Doce. Seus teores aumentaram após o rompimento da barragem de Fundão, porém, não de forma considerável, pois já estavam com um percentual alto de desconformidade antes do evento. O ensaio ecotoxicológico e *E. coli* apresentaram seus maiores índices nos anos de 2015 e 2018, respectivamente.

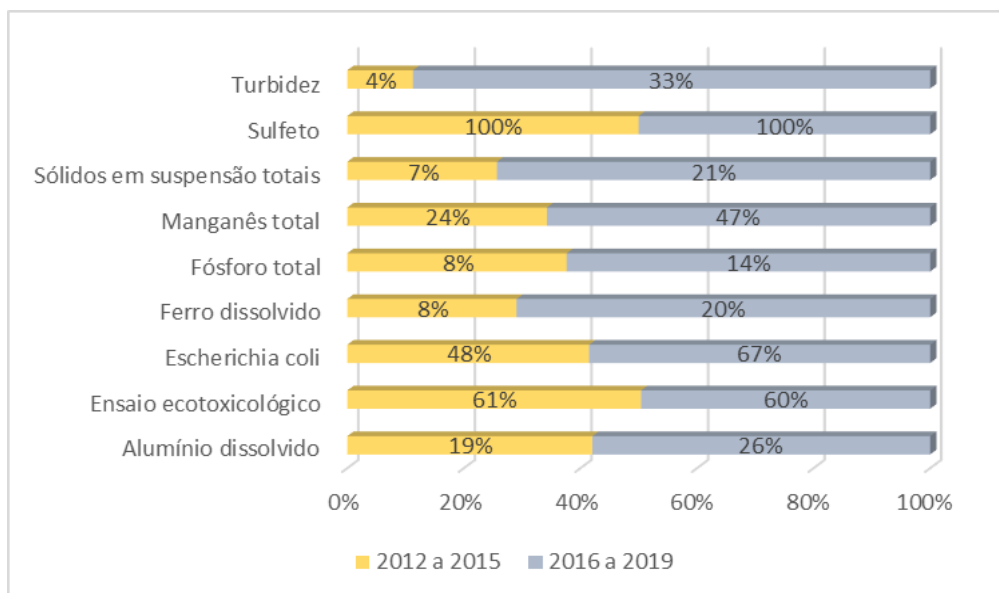
Os sulfetos possuem ligação com a atividade mineradora, pois, segundo Costa *et al.* (2010), os horizontes mineralizados podem ser enriquecidos em minerais a base de sulfetos, ricos em metais pesados. Neste estudo, esta variável apresentou um percentual de 100% de desconformidade em todos os anos, indicando que possivelmente o lançamento de mineradoras são constantes, independente do rompimento.

Os metais que mais manifestaram um percentual de desconformidade com a legislação foram o alumínio, ferro e manganês, na qual seus maiores índices foram nos anos de 2013, 2018 e 2016, respectivamente. Segundo Dias *et al.* (2018), a ação tóxica destes metais pode causar a bioacumulação em diversas espécies, potencializando o efeito das substâncias através de cadeias alimentares. Estes metais são encontrados em abundância no processo de mineração da barragem de Fundão.

Os sólidos em suspensão e a turbidez evidenciaram seus maiores percentuais no ano de 2016, provavelmente por influência do rompimento da barragem. Estes parâmetros trazem como consequência a redução da penetração da luz solar na coluna d'água, prejudicando a fotossíntese das algas e a obstrução de animais aquáticos em respirar e se alimentar.

Na Figura 4 são apresentadas as médias dos períodos de antes e depois do rompimento da barragem de Fundão, a partir das variáveis que apresentaram potencial de desconformidade com as legislações.

Figura 4 – Média do percentual de desconformidade das variáveis com os limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual, nos anos de 2012 a 2019.



Fonte: A autora.

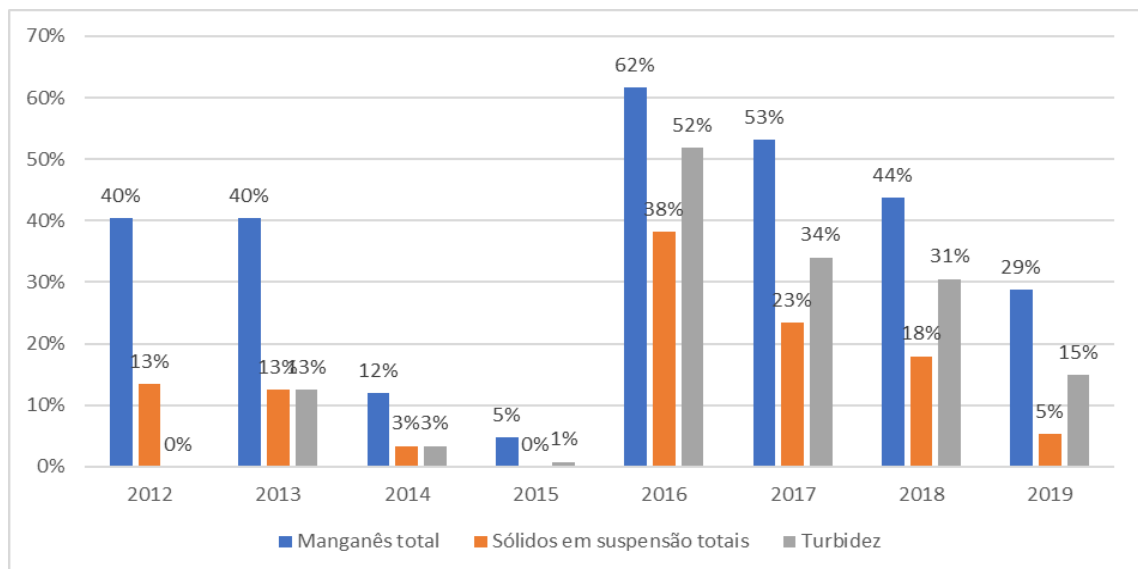
Nota-se, que ao comparar os percentuais dos parâmetros antes e após o desastre, há um aumento na desconformidade com as legislações de todas as variáveis, exceto

ensaio ecotoxicológico e, para o sulfeto que permaneceu com a quantidade máxima para todos os anos.

Os parâmetros que mais expandiram o percentual de divergência com as legislações foram turbidez, manganês, sólidos em suspensão e ferro dissolvido, respectivamente. De acordo com Dias *et al.* (2018), o rompimento da barragem afetou a qualidade da água, principalmente no parâmetro de turbidez, devido ao volume de sólidos em suspensão e a concentração de metais.

Ao comparar a Figura 2, a Figura 13 e a Figura 4, percebe-se que houve um aumento repentino no ano de 2016 para as variáveis de manganês, sólidos em suspensão e turbidez, o que não acontece para os outros parâmetros. O desastre do rompimento da barragem de Fundão ocorreu no dia 05 de novembro de 2015, o que pode explicar a elevação destes percentuais no ano de 2016.

Figura 5 - Percentual de desconformidade das variáveis de manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez, com os limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual, nos anos de 2012 a 2019.



Fonte: A autora.

Observa-se, que houve um aumento percentual entre os anos de 2015 e 2016. No ano de 2015 os parâmetros de manganês, sólidos em suspensão e turbidez apresentaram índices percentuais de 4,8%, 0% e 0,8%, respectivamente. Já no ano de 2016, os índices para os mesmos parâmetros apresentaram 61,6%, 38,1% e

51,8%, respectivamente. Os parâmetros continuaram com o percentual alto de desconformidade com as legislações até o ano de 2019, porém estão se estabilizando com o passar dos anos.

Segundo Espindola (2017), logo após o rompimento da barragem, foram aferidos elevados teores de manganês, na qual é considerado um metal pesado potencialmente tóxico. Além disso, a força da passagem da lama revolveu e colocou em suspensão os sedimentos contaminados dos processos de mineração do passado (IGAM, 2015), afetando diretamente os parâmetros de sólidos suspensos e a turbidez.

Na tabela 4 são apresentados os dados coletados pelo IGAM para o rio do Carmo, estação RD071, referentes as variáveis de manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez, nos períodos de 2015 e 2016, antes e depois do rompimento da barragem de Fundão.

Tabela 4 – Dados referente ao rio do Carmo, para as variáveis de manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez e, seus limites de qualidade de água estabelecidos pela legislação estadual, nos anos de 2015 e 2016.

	Manganês	Sólidos em suspensão	Turbidez
Limites estabelecidos	0,1	100	100
Data da Amostragem	Antes do rompimento da barragem de Fundão		
13/01/2015	0,044	8	3,6
07/04/2015	0,206	16	15,8
07/07/2015	0,035	14	1,9
06/10/2015	0,067	12	1,8
	Depois do rompimento da barragem de Fundão		
12/01/2016	1,375	1.692	3.365
05/04/2016	0,309	80	135
05/07/2016	0,061	294	41,7
30/9/2016	0,318	246	145
18/10/2016	0,199	352	93,7
7/11/2016	0,159	34	58,7
5/12/2016	1,143	406	5.228

Fonte: A autora.

Após o rompimento da barragem de Fundão, os dados referentes a todas as variáveis começaram a ser monitorados com mais frequência no período chuvoso, devido ao aumento de água e revolvimento dos sólidos.

Nota-se, que, ao comparar os dados de antes do rompimento da barragem com os limites estabelecidos pela legislação vigente, apenas a amostra do mês de abril (4) para a variável manganês obteve desconformidade. Já no período posterior ao rompimento da barragem, a maioria dos dados para as três (3) variáveis ficaram acima do limite estabelecido.

Destaca-se a última amostra antes do rompimento e a primeira após o rompimento, nos dias 06/10/2015 e 12/01/2016, respectivamente. No dia 06/10/2015, os teores para os parâmetros analisados ficaram muito abaixo da legislação vigente, o que representa conformidade com a qualidade da água para as variáveis analisadas.

No dia 12/01/2016, houve um aumento muito grande em comparação a última análise, obtendo um grau de desconformidade elevado para as três (3) variáveis estudadas. Segundo Guimarães (2018), este aumento considerável é consequência do rompimento da barragem de Fundão, que afetou uma área próxima a mineração e beneficiamento de minério.

Os dados sofreram uma queda com o passar dos meses, devido a sedimentação e escoamento dos materiais no rio, porém, obteve um aumento novamente no mês de dezembro devido as chuvas intensas locais. De acordo com Cupolillo *et al.* (2008), na bacia do rio Doce, o período chuvoso com maior intensidade é nos períodos de dezembro e janeiro e, além de afetar a qualidade da água, causa enchentes urbanas que ocorrem em vários municípios ribeirinhos.

A Figura 6 apresenta a correlação entre as variáveis analisadas, nos anos de 2012 a 2015. Destaca-se a correlação entre o cloreto e a condutividade elétrica com 0,79 (79%) e a correlação de turbidez com sólidos em suspensão total com 0,89 (89%).

Figura 6 – Matriz de correlação entre os anos de 2012 a 2015.

	Colif. Totais	CE	Cl ⁻	Clor a	Cu	E. Coli	DBO	P total	NO ₃	NH ₄ ⁺	pH	OD	SDT	SST	Turb
Colif. Totais	1,00														
CE	0,03	1,00													
Cl⁻	0,09	0,79*	1,00												
Clor a	0,00	-0,09	-0,02	1,00											
Cu	0,06	-0,04	-0,04	0,01	1,00										
E. Coli	0,45*	-0,04	-0,03	0,15*	0,12	1,00									
DBO	0,00	0,03	-0,01	0,35*	-0,02*	0,02	1,00								
P total	0,23*	-0,09	-0,04	0,17*	-0,01	0,16	0,05	1,00							
NO₃	0,03	0,37*	0,38*	-0,18*	-0,04	-0,12*	0,01	-0,04	1,00						
NH₄⁺	0,09	0,09	0,14*	-0,07	0,04	0,05	-0,01	0,04	0,08	1,00					
pH	-0,07	0,16*	0,09*	0,13*	0,00	-0,12*	0,13*	-0,02	-0,03	-0,03	1,00				
OD	-0,08	0,04	-0,04	0,29*	0,01	-0,03*	0,17*	-0,14*	-0,05	0,08	0,19*	1,00			
SDT	0,26*	0,34*	0,44*	-0,04	-0,05	0,00	-0,03	0,32*	0,26*	0,05	-0,03	-0,22	1,00		
SST	0,28*	-0,22*	-0,13*	0,21*	0,01	0,10*	0,01	0,43*	-0,03	-0,05	-0,17*	-0,02	0,24*	1,00	
Turb	0,28*	-0,26*	-0,11*	0,24*	0,02	0,06	0,00	0,47*	0,01	-0,02	-0,23*	-0,07	0,38*	0,89*	1,00

(*) Significante à 5% de probabilidade

Fonte: A autora.

A correlação existente entre os parâmetros de condutividade elétrica e cloreto alcançou 79%, reforçando a relação citada por Gardiman Junior (2015) onde diz que a condutividade elétrica depende diretamente de concentrações iônicas e da temperatura indicando a quantidade de sais existentes na coluna d'água e, portanto, representa uma medida indireta da concentração desses poluentes.

A correlação entre sólidos em suspensão total e a turbidez foi a maior entre a matriz de correlação. Nela, a correlação alcançou 89%, devido a sua proporção diretamente proporcional, ou seja, com o aumento de sólidos suspensos na água, torna-a água mais turva, o que intercepta a passagem da luz natural, influenciando na turbidez.

A Figura 7 apresenta a correlação entre as variáveis analisadas, nos anos de 2016 a 2019. Destaca-se a correlação entre a turbidez com sólidos em suspensão total com 0,91 (91%).

Figura 7 – Matriz de correlação entre os anos de 2016 a 2019.

	Colif.	CE	Cl ⁻	Clor a	Cu	<i>E. Coli</i>	DBO	P total	NO ₃	NH ₄ ⁺	pH	OD	SDT	SST	Turb
Totais	1,00														
Colif. Totais	1,00														
CE	-0,07	1,00													
Cl⁻	-0,03	0,60*	1,00												
Clor a	0,04	0,05	0,09	1,00											
Cu	0,06	-0,03	0,07	0,27*	1,00										
<i>E. Coli</i>	0,51*	-0,05	-0,06	-0,04	-0,02	1,00									
DBO	0,31*	0,01	0,04	0,06	0,09	0,23*	1,00								
P total	0,30*	-0,18*	-0,05	0,02	0,37*	0,14*	0,15*	1,00							
NO₃	-0,03	0,34	0,38*	-0,05	-0,19	-0,01	0,04	-0,03	1,00						
NH₄⁺	0,11*	0,05	0,18*	-0,03	-0,02	0,18*	0,13*	0,10	0,18*	1,00					
pH	-0,12*	0,38*	0,15*	0,08	0,07	-0,10*	0,05	-0,09*	0,11*	0,01	1,00				
OD	-0,16*	0,10	0,00	0,00	-0,05	-0,14*	-0,01	-0,11*	0,02	-0,15*	0,18*	1,00			
SDT	0,20*	-0,09*	0,10*	0,05	0,26	0,13*	0,04	0,28*	-0,05	0,18*	-0,07	-0,17*	1,00		
SST	0,32*	-0,19*	-0,13*	0,04	0,39*	0,17*	0,10	0,34*	-0,15*	0,24*	-0,04	-0,15*	0,37*	1,00	
Turb	0,25*	-0,22*	-0,11*	0,01	0,28*	0,14*	0,11	0,42*	-0,15*	0,28*	-0,03	-0,19*	0,42*	0,91*	1,00

(*) Significante à 5% de probabilidade

Fonte: A autora.

Assim como nos períodos anteriores, a correlação entre sólidos em suspensão e a turbidez teve um maior grau de significância, de acordo com a matriz de correlação. O percentual da correlação sofreu um aumento de 2% comparado aos anos anteriores.

Segundo Almeida e Schwarzbald (2003), as variáveis de turbidez e sólidos suspensos possuem um comportamento semelhante, onde os valores refletem a condição local, com aumento em pontos de maior poluição.

O rompimento da barragem de Fundão pode ter sido consequência deste aumento de percentual, uma vez que a lama, fruto da mineração, revirou todos os elementos presentes na água, erguendo materiais e fazendo com que elevasse os teores de sólidos em suspensão e turbidez.

Para Costa *et al.* (2001), o material concentrado nas barragens de rejeitos, quando não tratado, pode causar considerável alteração nas características físico-químicas da água do corpo hídrico envolvido. Assim sendo, as principais alterações que podem ser esperadas se referem ao grande volume de sólidos em suspensão e alto teor de turbidez.

6 CONCLUSÃO

Após análise dos resultados, pode-se concluir que as variáveis alumínio, *E. coli*, ensaio ecotoxicológico, ferro dissolvido, fósforo total, manganês, sólidos em suspensão, sulfeto e turbidez, já estavam identificadas acima do limite para um rio de Classe 2, de acordo com a COPAM/CERH-MG nº 1/2008 antes do desastre. Portanto, já apresentava sinais de degradação ambiental, através da poluição das águas.

Os dados referentes a *E. coli*, ensaio ecotoxicológico e sulfetos realizados ao longo dos anos, demonstraram que o rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce na sua fração mineira, já sofria em relação à contaminação devido ao esgotamento sanitário, mas que foi potencializada no período imediato após o rompimento da barragem.

No ano de 2016, logo após o rompimento da barragem de Fundão, houve alterações percentuais repentinas somente para as variáveis de sólidos em suspensão, turbidez e manganês, devido a grande quantidade de rejeito de mineração depositada nos rios. Este percentual pode causar consequências a fauna e flora dos rios, como dificuldade de respiração/fotossíntese e bioacumulação.

Perante a matriz de correlação, a relação que obteve maior significância foi entre as variáveis de sólidos em suspensão e turbidez. O teor de correlação encontrado pode ter ligação direta com o rompimento da barragem, devido ao deslocamento da lama no decorrer dos rios, demonstrando que a mineração causou alterações pertinentes, principalmente sobre as variáveis relacionadas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens**. Brasília: ANA, 2015. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem>>. Acesso em: 15 de set. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Encarte Especial Sobre a Bacia do Rio Doce** - Rompimento da Barragem em Mariana MG. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf>. Acesso em: 26 out. 2022.

ALMEIDA, M. A. B.; SCHWARZBOLD, A. Avaliação sazonal da qualidade das águas do Arroio da Cria Montenegro, RS com aplicação de um índice de qualidade de água (IQA). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 81-97, 2003.

BRASIL COLETA. **Legislação Ambiental: Para Que Serve?**. 2019. Disponível em: <<https://www.brasilcoleta.com.br/>>. Acesso em: 10 de out. de 2022.

CARREIRO, D. A. Avaliação do uso e ocupação do solo na qualidade ambiental da água de reservatórios de abastecimento em uma sub-bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu. 2021.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM). **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 05 de maio de 2008**. Classificação dos corpos de água e condições e padrões de lançamento de efluentes, 2008. Disponível em: <<https://www.compe.org.br/estadual/deliberacoes/conjunta/1-2008>>. Acesso em: 05 de out. 2022.

COSTA, A. C. A.; DUTA, F. P.. Bioaccumulation of copper, zinc, cadmium and lead by *Bacillus* sp., *Bacillus cereus*, *Bacillus sphaericus* and *Bacillus subtilis*. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 32, p. 1-5, 2001.

COSTA, A. T.; NALINI JR., H. A.; CASTRO, P. T.; TATUMI, S. H. Análise estratigráfica e distribuição do arsênio em depósitos sedimentares quaternários da porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, bacia do Ribeirão do Carmo, MG. **REM: Revista da Escola de Minas**, v. 63, n. 4, p. 703-714, out. dez. 2010.

CUPOLILLO, F.; DE ABREU, M. L.; VIANELLO, R. L.. Climatologia da bacia do rio Doce e sua relação com a topografia local. **Revista Geografias**, p. 45-60, 2008.

DIAS, C. A., DA COSTA, A. S. V., GUEDES, G. R., DE MATOS UMBELINO, G. J., DE SOUSA, L. G., ALVES, J. H., & SILVA, T. G. M. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço**, 2018.

ESPINDOLA, H. S., CAMPOS, R. B. F., LAMOUNIER, K. C. C., & SILVA, R. S.. Desastre da Samarco no Brasil: desafios para a conservação da biodiversidade. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 5, n. 3, p. 72-100, 2016.

FAGUNDES, M. Uma Cidade Feita de Minério. **Revista Dois Pontos**. 2013. Disponível em: <http://revistadoisPontos.com>. Acesso em: 28 de janeiro de 2021.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2016. Disponível em: <www.feam.br/gestao-de-barragens/inventario-de-barragens>. Acesso em: 01 de fevereiro 2022.

FERNANDES, K. N. **Qualidade das águas nos Rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo-Afluentes do Alto Rio Doce (Watu): metais, metaloides e Índice de Qualidade das Águas antes e após o rompimento da barragem de rejeitos Fundão da Samarco/VALE/BHP Billiton, em Mariana, MG**. 2017. Tese de Doutorado. Dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto.

GARDIMAN JUNIOR, B. S. Caracterização do processo de poluição das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Jucu, estado do Espírito Santo, Brasil. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 9, n. 3, p. 235-242, 2015.

GUEDES, H. A., SILVA, D. D. D., ELESBON, A. A., RIBEIRO, C., MATOS, A. T. D., & SOARES, J. H. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 558-563, 2012.

GUIMARÃES, J. I. Impacto do rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro sobre a qualidade das águas superficiais. **Estudo de caso: bacia do Rio Doce**. 2018.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Monitoramento da qualidade das águas superficiais na bacia do rio Doce - Relatório Final**. Minas Gerais: IGAM, 2010a. Disponível em: < www.cbhdoce.org.br >. Acesso em: 12 janeiro 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações Para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce - Relatório Final**. Minas Gerais: IGAM, 2010b. Disponível em: < www.cbhdoce.org.br >. Acesso em: 12 janeiro 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce - Diretrizes para a Gestão da Bacia do Rio Doce**. Minas Gerais: IGAM, 2010c. Disponível em: < www.cbhdoce.org.br >. Acesso em: 12 janeiro 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce Após o Rompimento da Barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG**. Minas Gerais: IGAM, 2015. Disponível em: < www.cbhdoce.org.br >. Acesso em: 26 maio 2021.

The jamovi project (2021). jamovi. (Version 1.6) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.

JOHNSON, R. A.; & WICHERN, D. W. Applied multivariate statistical analysis. **New Jersey**, v. 405, 1992.

LIDIANE, L. M. K., KUANG, H., PATRÍCIA, B. C., & MILTON, P. J.. Análise fatorial por meio da matriz de correlação de Pearson e Policórica no campo das cisternas. **ES Engineering and Science**, v. 7, n. 1, p. 58-70, 2018.

LIMA, H. S. **Qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do rio Doce e sua relação com aspectos socioambientais**. 157 f. 2015. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais.

MELO JUNIOR, J. C., SEDIYAMA, G. C., FERREIRA, P. A., & LEAL, B. G.. Determinação de regiões homogêneas quanto à distribuição de frequência de chuvas no leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 408-416, 2006.

MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos estatística multivariada: uma abordagem aplicada. In: **Análise de dados através de métodos estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. 2007. p. 295-295.

NASCIMENTO, R. A. **Análise dos impactos e repercussões do evento pluvial intenso no município de Piranga-MG, em 17 de dezembro de 2008**. 129f. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Monografia em Geografia). Curso de Geografia. Departamento de Geografia, UFV-MG, Viçosa-MG.

PEREIRA, J. C. R. Análise de dados qualitativos: estratégia metodológicas para as ciências da saúde humanas e sociais. In: **Análise de dados qualitativos: estratégia metodológicas para as ciências da saúde humanas e sociais**. 1999. p. 156-156.

PETERS, N. E.; MEYBECK, M. Water quality degradation effects on freshwater availability: impacts of human activities. **Water International**, v. 25, n. 2, p. 185-193, 2000.

TOLEDO, L. G. de; NICOLELLA, G. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. **Scientia Agrícola**, v.59, p.181-186, 2002.

VICINI, L.; SOUZA, A. M. Análise multivariada da teoria à prática. Santa Maria: UFSM, **CCNE**, 2005.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. **Editora UFMG**, 2011.